

ANALIZA PROMJENE KOEFICIJENTA OTJECANJA TIJEKOM GODINE NA SLIVU SLANI POTOK

ANALYSIS OF THE RUNOFF COEFFICIENT CHANGES DURING THE YEAR ON SLANI POTOK CATCHMENT AREA

Ivana Sušan^j*, Ernesto Rosanda^{**}, Nevenka Ožanić*

Sažetak

Koeficijent otjecanja sa sliva jest odnos efektivne (neto) oborine i oborine koja padne na sliv (bruto oborina) i veoma je značajna varijabla u analizama procesa otjecanja oborine s određenog sliva i vodne bilance. Koeficijent otjecanja računa se uobičajeno na godišnjoj i mjesečnoj razini, a u ovom je radu prikazana njegova promjena tijekom pojedinih kišnih događaja u jednoj godini i analizirani su faktori koji na nju značajno utječu. Na temelju prikupljenih meteoroloških i hidroloških podataka značajnih oborinskih epizoda za 2014. godinu prikazani su rezultati analize godišnje promjene koeficijenta otjecanja sa sliva Slanog potoka.

Ključne riječi: koeficijent otjecanja, oborina, sliv, Slani potok

Abstract

The runoff coefficient represents the ratio of the effective (net) precipitation to the precipitation that falls on the basin (gross rainfall) and it is a very important variable in the analysis of the rainfall and runoff process and the water balance. The runoff coefficient is usually calculated on an annual and monthly basis. The aim of this paper is to show the change during the year and the factors that affect it. The results of the runoff coefficient change analysis during the year on the case study of Slani potok catchment have been presented. The analysis was conducted on the collected meteorological and hydrological data of significant rainfall episodes during 2014.

Key words: runoff coefficient, rainfall, catchment, Slani potok

*Građevinski fakultet; Radmile Matejčić 3; 51000 Rijeka

E-mail: isusani.nozanic@gradri.uniri.hr

**GP Krk; Stjepana Radića 31; 51500 Krk

E-mail: ernesto.rosanda@gp-krk.hr

1. Uvod

U radu je opisana metodologija i rezultati analize promjene koeficijenta otjecanja tijekom jedne godine za istražno područje sliva Slanog potoka koji je jedan od podslivova rijeke Dubračine na području Vinodolske doline. Ovaj je rad rezultat suradnje pri izradi diplomskog rada studenta.

Motivacija za istraživanje i analizu koeficijenta otjecanja proizišla je iz potrebe za boljim definiranjem čimbenika otjecanja na malim slivovima bujičnog karaktera te radi pripreme adekvatne podloge za izradu detaljnih analiza predmetnog sliva.

Koeficijenti otjecanja analizirani su za deset značajnih kišnih događaja tijekom 2014. godine. Cilj istraživanja promjene koeficijenata otjecanja jest proučavanje ponašanja slivne površine tijekom godine u vezi s oborinama različitih intenziteta i promjenom godišnjih doba, odnosno s promjenom čimbenika otjecanja, kao što su primjerice promjena vegetacije tijekom godine ili saturiranost tla vodom.

Kako bi bilo moguće analizirati koeficijente otjecanja za mali sliv Slanog potoka, trebalo je provesti mjerenja meteoroloških i hidroloških varijabli te potom analizirati prikupljene podatke. Ovaj je rad zato podijeljen u nekoliko cjelina, pa su opisani istražno područje i procedure mjerenja varijabli na njemu, predstavljena je metodologija izračuna koeficijenta otjecanja i diskutirani rezultati proizašli iz analize.

2. Opis istražnog područja Slani potok te prethodna istraživanja

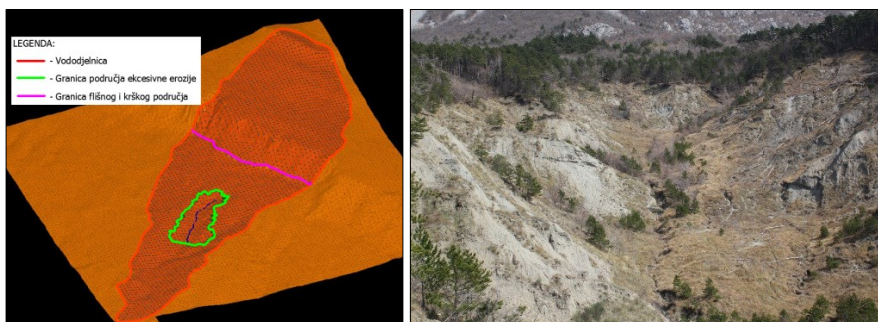
Sliv Slanog potoka dio je sliva rijeke Dubračine, koji se nalazi u središnjem dijelu Vinodolske doline, a izdvojena je geografska cjelina istočnoga kvarnerskog prostora [1]. U geografskom je smislu Vinodol jedinstvena prostorna cjelina između Križišća na sjeverozapadu i Novog Vinodolskog na jugoistoku te primorja uz Vinodolski kanal.

Područje sliva Slanog potoka čini jedan od mnogobrojnih lijevih pritoka rijeke Dubračine. Sliv Slanog potoka smješten je u središnjem dijelu Vinodolske doline te se proteže pravcem sjeverozapad-jugoistok, kao što je prikazano na Slici 1.



Slika 1. Situacijski prikaz sliva Slanog potoka [2]

Sliv bujičnog vodotoka Slanog potoka je primjer kombiniranog djelovanja erozije s pratećim pojavama klizanja. Žarište te pojave nalazi se u slivu Slanog potoka, a prikazano je na digitalnom modelu terena na Slici 2.



Slika 2. Prikaz granica sliva Slanog potoka i granica žarišta erozije na digitalnom modelu terena i fotografija erozivnih procesa [2]

Teren koji je zahvaćen pretjeranom (ekscesivnom) erozijom ima dimenzije od otprilike 600 m po osi i 250 m po širini te površinu od 3 km². Popratne pojave oko žarišta erozije, kao i u njemu samome, su brojna klizišta prouzročena trošenjem matičnih stijena flišnoga kompleksa i pretvaranja stijene u inženjersko tlo [3]. Posljedica tih procesa su bujice, muljni tok i debratne poplave. Zahvaćena površina obuhvaća i okolna naselja Belgrad,

Baretiće, Grižane i Kamenjak, uz koje su ugrožene prometna i ostala komunalna infrastruktura.

Iz analize koju su na području sliva Slani potok provele Hrvatske vode 2004. godine je moguće identificirati različite pokrove, odnosno površine prekrivene crnogoričnom i bjelogoričnom šumom, područja obrasla grmljem, žbunjem i makijom, golet (erozijska površina) i urbano područje.

Sliv Slanog potoka je povijesno prepoznat prostor pod utjecajem štetnih pojava prouzročenih djelovanjem vode, što je dugogodišnji i kompleksan problem čijem rješenju treba pristupiti multidisciplinarno. Upravo zbog toga to područje već cijeli niz godina privlači mnoge istraživače koji svojim raznolikim pristupima pridonose boljem shvaćanju procesa koji se odvijaju na tom području, rezultat čega je niz objavljenih znanstvenih radova. Za ovo su istraživanje značajni radovi Benca i sur. [4], u kojemu se objašnjava proces ekscesivne erozije, Aljinovića i sur. [5], u kojemu je opisana geološka struktura te procesi nastanka erozije na slivu Slanog potoka, Ružića i sur. [3], u čijem su radu analizirana otjecanja sa sliva Slanog potoka i izvora rijeke Dubračine te rad Sušanji i sur. [6], koji izrađuju bazu podataka stanja vodotoka na području Vinodolske doline.

Prethodna istraživanja sliva Slanog potoka ukazuju na nedostatak meteoroloških i hidroloških mjerenja, a cjelokupna složena problematika područja motivira za daljnje istraživanje.

Glavni čimbenik nastanka štetnih pojava na istražnom području jest oborina i njezino otjecanje, pa je u ovom radu istraživanje usmjereno k promatranju oborina. Analizi koeficijentata otjecanja trebaju prethoditi definicije i opisi čimbenika koje uvjetuju otjecanje sa sliva i osnovnih fizičkih osobina sliva, kao što su: (i) površina i oblik sliva, (ii) srednja nadmorska visina sliva, (iii) pad sliva, (iv) pad vodotoka te (v) specifična gustoća drenske mreže. Fizičke osobine sliva detaljno su analizirane u radu [2] i radu [7], pa će se za potrebe ovog rada u nastavku prikazati samo rezultati tih analiza.

Topografski sliv Slanog potoka određen je na topografskoj karti mjerila $M 1: 25000$ te iznosi $A = 2,2 \text{ km}^2$, a pruža se od 50 do 700 m n. m. Donji dio sliva površine $A = 0,9 \text{ km}^2$ prekriven je flišom te čini glavninu površinskog otjecanja. Gornji dio sliva većinom je krška zaravan s koje su otjecanja puno manja. U zoni kontakta fliša i krša nalazi se više preljevnih izvora, koji čine glavninu vodne bilance u sušnom razdoblju [3]. Opseg je sliva prema određenom topografskom slivu $O = 7,481 \text{ km}$, dok je udaljenost od težišta sliva do protjecajnog profila jednaka $U = 1,906 \text{ km}$. Duljina glavnog vodotoka određena je na temelju topografske karte, te iznosi $L = 2,15 \text{ km}$.

Oblik sliva je određen koeficijentom koncentriranosti sliva K i vizualnom analizom sliva. gdje koeficijent koncentriranosti proračunan prema D .

Srebrenoviću iznosi $K = 0,3$, prema R. E. Hortonu iznosi $K = 0,47$, a prema H. Graveliusu iznosi $K = 1,41$. Prema provedenoj proračunskoj i vizualnoj analizi zaključuje se da sliv Slanog potoka ima „izdužen“ oblik [2]. Izduženi oblik sliva isprva upućuje na pojavu izduženih hidrograma s neizraženim maksimumom. Međutim, kako se geološka građa sliva Slanog potoka dijeli na dvije zone (flišni i krški dio) za koje se koeficijenti otjecanja značajno razlikuju, hidrogrami imaju istaknute maksimume, a vodotok pokazuje brz odziv na palu oborinu. Zato je ovaj sliv uputnije klasificirati kao sliv „okrugla“ oblika, uzme li se u obzir oblik flišne površine sliva s mnogo izraženijim otjecanjem [2].

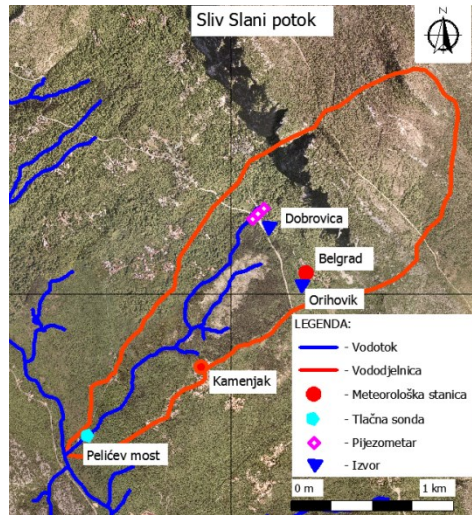
Srednja nadmorska visina određena je na temelju digitalnog modela terena razlučivosti 25×25 metara i primjenom programskog paketa MATLAB R2012b (MathWorks). Srednji je pad sliva 22%, a nagibi se kreću u rasponu od 5% do 100%, što sliv karakterizira kao veoma strm. Nagibi sliva utječu na uvjete otjecanja i procese erozije, koji su na području Slanog potoka veoma izraženi. Razmotri li se samo dio sliva na flišnoj podlozi, srednji nagib sliva iznosi 19% [3]. Pad vodotoka nije analiziran jer na slivu Slanog potoka ne postoji geodetska snimka uzdužnog pada vodotoka.

Specifična gustoća drenske mreže je proračunana iz izraza koji je dao Žugaj [8]. Za sliv Slanog potoka ona iznosi $D = 1,45 \text{ km/km}^2$, pa se sliv može smatrati „srednje“ dreniranim.

3. Hidrološka i meteorološka mjerenja na istražnom području Slanog potoka

U sklopu međunarodnoga hrvatsko-japanskoga znanstvenog projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj“ (eng. Risk Identification and Land Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia), 2009. godine započinju sveobuhvatna geološka, hidrogeološka i hidrološka istraživanja na području Vinodolske doline, pa tako i na području Slanog potoka.

Na Slici 3. prikazani su postavljeni instrumenti na području sliva Slanog potoka, čime su uspostavljena meteorološka i hidrološka mjerenja za potrebe istraživanja.



Slika 3. Situacijski prikaz postavljenih instrumenata na području sliva Slani potok [2]

3.1. Hidrološka mjerenja

Od 2012. godine započinju kontinuirana mjerenja razina vode tlačnom sondom, a korištena je tlačna sonda miniDiver (DI502 – 20 m) proizvođača Schlumberg Water Services. Zbog bujičnih karakteristika vodotoka, odnosno brzog odziva sliva na pale oborine, određen je dvominutni korak pohrane kako bi bilo moguće zabilježiti naglo podizanje razina vode, a iz mjerenja izraditi što točniji nivogram. Tlačna sonda postavljena je na unaprijed određenom profilu vodotoka, na bujičnoj pregradi, 0,20 metara ispod kote preljevne razine pregrade, pri čemu izmjerena razina vode veća od 0,20 metara predstavlja preljevnu razinu vode.

3.2. Meteorološka mjerenja

Na slivu Slanog potoka su tijekom 2012. godine postavljene dvije automatske meteorološke postaje Vantage Pro 2 proizvođača Davis Instruments Corporation, za kontinuirano prikupljanje sljedećih meteoroloških podataka: (i) količina oborine, (ii) intenzitet oborine, (iii) temperatura zraka, (iv) tlak zraka, (v) vlažnost zraka, (vi) solarna radijacija (insolacija), (vii) smjer vjetra i (viii) brzina vjetra.

Razlog postavljanja dviju meteoroloških postaja jest utvrđivanje razlike između meteoroloških podataka na površini sliva, a pokazalo se da oborine imaju ravnomjernu raspodjelu. Kako se ovdje analizira koeficijent otjecanja na malom slivu Slanog potoka, vremenski korak mjerenja za meteorološke varijable određen je $\Delta t = 10$ minuta, a za hidrološke $\Delta t = 2$ minute. Za potrebe

ovog rada analizirat će se oborinski događaji iz 2014. godine jer je količina oborine u toj godini bila značajna.

4. Metodologija analize koeficijenta otjecanja

4.1. Koeficijent otjecanja

Koeficijent otjecanja (c) jest odnos efektivne (neto) oborine i oborine koja padne na sliv (bruto oborine), odnosno postotak otjecanja u odnosu na bruto količinu oborine koja padne na neko slivno područje [8].

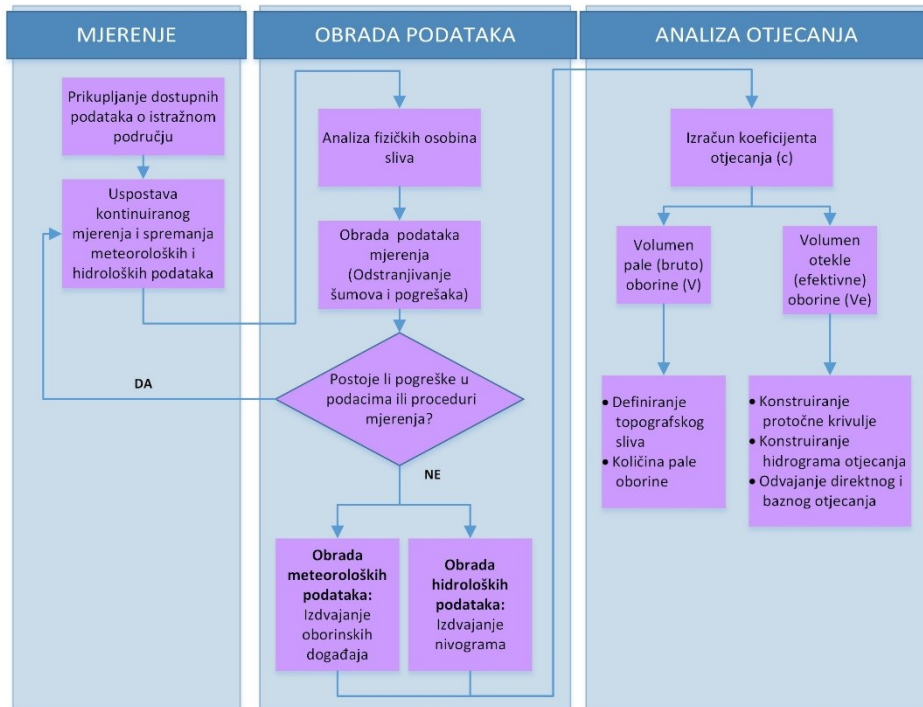
Koeficijent otjecanja kreće se u granicama od $c = 0$ do $c = 1$. Kada je vrijednost koeficijenta jednaka nuli, ne postoji površinsko otjecanje po tlu, tj. sva pala oborina infiltrira se u tlo ili isparava natrag u atmosferu. Tla kod kojih se pojavljuje vrijednost nula u potpunosti su vodopropusna, a takva su tla npr. šljunčana ili pjeskovita. Kada je vrijednost koeficijenta jednaka 1, površinsko je otjecanje maksimalno, tj. sva pala oborina otječe površinski i nema gubitaka zbog infiltracije ili isparavanja [8].

Volumen bruto oborine (V) jest ukupna oborina koja padne na određeni sliv, dok je volumen efektivne oborine (V_e) samo onaj dio bruto oborine koji površinski otječe po površini sliva.

Koeficijent otjecanja je važan za razumijevanje upravljanja učestalošću pojavljivanja poplava u posebnim hidrološkim ili klimatskim uvjetima [9]. Pokazao se i korisnim parametrom u procjeni količine vlage pri bilanciranju, pokazatelj je promjena korištenja zemljišta i primjenjiv u obnovi podzemnih rezervi vode [10]. Većina današnjih studija obuhvaća analizu koeficijenta otjecanja kroz njegovu prostornu i vremensku varijabilnost te faktore koji utječu na njegove promjene, poput klime, geologije, topografskih obilježja, korištenja zemljišta i početnih uvjeta vlažnosti tla [9, 11]. Ukorak s klimatskim promjenama istraživanja su usmjerena i na dugoročne promjene koeficijenata otjecanja tijekom godišnjih doba, kako je to istaknuto u radu [12]. Većina istraživanja usmjerena je na analizu godišnjeg ili mjesečnog koeficijenta otjecanja, dok se analiza koeficijenta otjecanja pojedinih kišnih događaja primjenjuje pri utvrđivanju varijabli koje utječu na otjecanje sa sliva [9] te pri razvoju modela učestalosti poplava [13].

4.2. Metodologija analize i izračuna koeficijenta otjecanja

Metodologija izračuna koeficijenta otjecanja (c) prikazana je dijagramom toka koraka koje je potrebno provesti pri analizi na Slici 4.



Slika 4. Metodologija izračuna koeficijenta otjecanja (c)

Metodologija analize koeficijenta otjecanja obuhvaća tri grupe koraka: (i) mjerenje, (ii) obrada podataka i (iii) analiza otjecanja, kako je prikazano na Slici 4. Svaka grupa koraka bit će detaljnije opisana u nastavku rada.

Prva grupa koraka (mjerenje) obuhvaća prikupljanje dostupnih podataka o određenome istražnom području te, po potrebi, mjerenje meteoroloških i hidroloških podataka kojem treba prethoditi definiranje jasne i točne procedure jer je važno umanjiti mogućnost pogreške mjerenja, a korak mjerenja prilagoditi veličini sliva. Za male je slivove bitno da korak mjerenja ne prelazi $\Delta t = 10$ minuta.

Druga grupa koraka obuhvaća obradu podataka, a važno je provesti i analizu fizičkih osobina sliva. Za prikupljene podatke treba provjeriti osjetljivost cjelokupnog niza na sustavne i slučajne pogreške, te odstraniti moguće šumove u podacima. Nakon toga, iz niza podataka treba izdvojiti reprezentativne oborinske događaje i nivograme vodotoka.

Treća metodološka grupa obuhvaća analizu otjecanja, koja se u prvom redu zasniva na usporedbi volumena bruto oborine (V) i volumena efektivne oborine (V_e).

Za proračun volumena bruto oborine (V) je važno najprije definirati topografski sliv vodotoka, odnosno površinu za koju se prema topografskoj karti izračunava koeficijent otjecanja sliva, a zatim s meteoroloških postaja unutar sliva prikupiti podatke o palim oborinama u traženom vremenskom razdoblju. Iz količine oborina množene s površinom topografski određenog sliva se proračunava volumen bruto oborine (V), kako je prikazano jednadžbom (1), gdje su oznaka V volumen bruto oborine (m^3), oznaka A topografska površina sliva (m^2) a oznaka P količina pale oborine izražene u metrima (m).

$$V = A \cdot P \quad (1)$$

Nakon proračunavanja volumena bruto oborine (V) treba odrediti volumen efektivne oborine (V_e). Nivogram se prikazuje očitavanjem podataka s hidroloških postaja unutar sliva, odnosno podataka o razini vode u traženom vremenskom razdoblju. Na nivogramu se određuju vrijeme porasta i vrijeme opadanja vodnog vala nastalog od pale oborine. Na mjestu bilježenja razine vode treba izmjeriti ili proračunati geometriju protočne površine te ustvrditi uvjete tečenja kako bi se, ovisno o razini vode ili brzini vode, mogao odrediti protok. Ovisnost protoka i razine vode se prikazuje protočnom krivuljom, grafički. Protok se može proračunati s obzirom na uvjete tečenja, primjerice u kanalu, na preljevu, itd.

Budući da se protok ovdje proračunava na bujičnoj pregradi, jednadžba za izračunavanje protoka Q je u ovom radu preuzeta je od Vukovića [15]. Kako se radi o nepotopljenom preljevu, korištena je jednadžba (2), u kojoj su Q oznaka za protok (m^3/s), m_o , za koeficijent protoka na preljevu (ovisan je o konstrukcijskim osobinama pojedinih vrsta preljeva), b_p je oznaka duljina preljeva duž fronte preljeva (m), g je oznaka ubrzanja polja sile teže (m/s^2), a H označava geometrijsku preljevnu visinu (m).

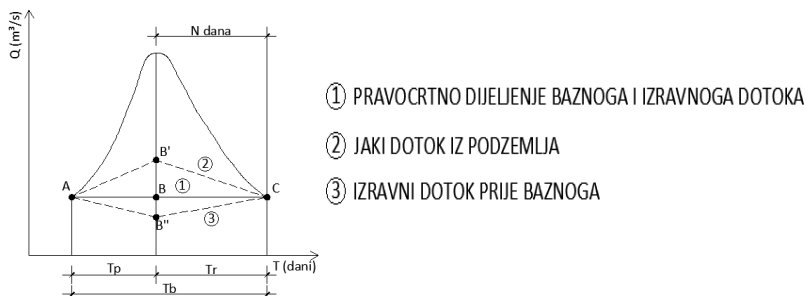
$$Q = m_o b_p \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2)$$

Duljina preljeva b_p se može zamijeniti srednjom duljinom preljeva b_{sr} , prema prijedlogu izračuna Gjurovića [16], za geometriju preljeva koja je trapezna, a nije pravokutna. Ako se širina dna trapeznoga preljevnog profila označi s b i nagib strana trapeza n , gdje je $n = \cotg \varphi$, tada se b_{sr} proračunava kako je prikazano u izrazu (3).

$$b_{sr} = b + 0,8nH \quad (3)$$

Idući korak je konstruiranje hidrograma iz poznatih podataka o protoku i vremenu protjecanja. Hidrogram grafički prikazuje protok Q (m^3/s) u vremenu t (s). Na hidrogramu je potrebno odijeliti direktno i bazno otjecanje, te dobiti bazu hidrograma T_b . Mogu se pojaviti tri karakteristična slučaja odjeljivanja direktnog od baznog otjecanja, jednostavno prikazana na Slici 5

[17]: (i) točke A, B i C na istom su pravcu, (ii) prihranjivanje je vode iz podzemlja u vodotok jako, pa je točka B' iznad A i C i (iii) površinsko tečenje odvija se prije podzemnoga, pa je točka B'' ispod točaka A i C.



Slika 5. Tri slučaja dijeljenja (separacije) hidrograma prema Srebrenoviću (T_p – vrijeme porasta; T_r – vrijeme opadanja; T_b – baza hidrograma) [17] (Trebali bi pisati pod 1 – baznog i izravnog dotoka)

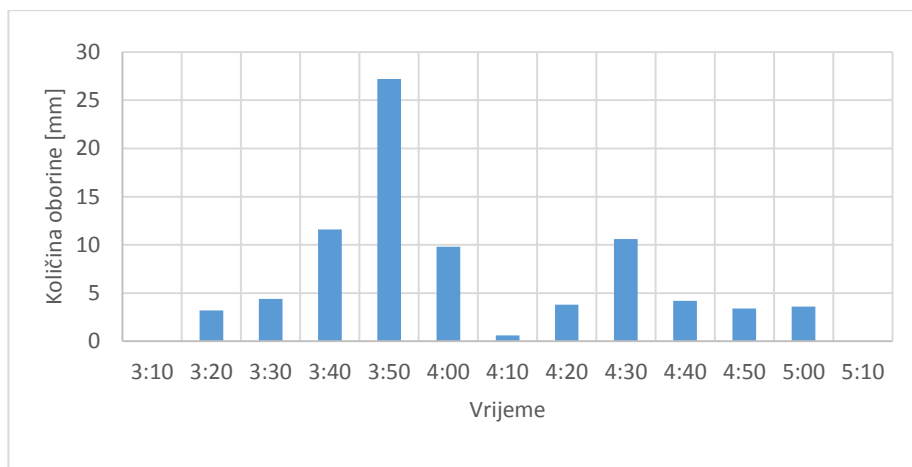
Nakon što se odabere jedan od načina odvajanja direktnog od baznog otjecanja, treba izračunati površinu ispod hidrograma i dobiti volumen efektivne oborine (V_e). Posljednji korak u izračunavanju traženog koeficijenta otjecanja (c) jest dijeljenje volumena efektivne oborine (V_e) s volumenom bruto oborine (V), prema izrazu (4).

$$c = \frac{V_e}{V} \quad (4)$$

5. Rezultati analize koeficijenta otjecanja na Slivu Slanog potoka

5.1. Volumen bruto oborine

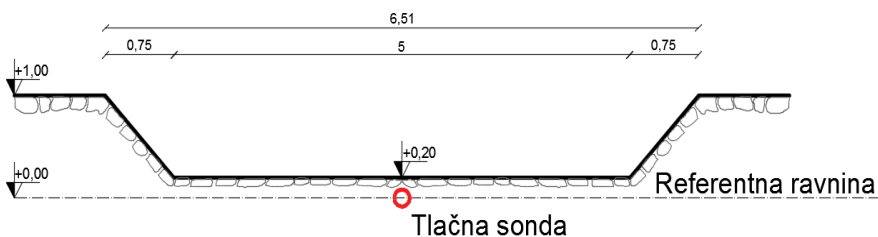
Za potrebe analize provedene u ovom radu je obrađeno deset značajnih kišnih događaja koji su prouzročili pojavu vodnih valova tijekom 2014. godine. U izračunu su korišteni podaci o palim oborinama s meteoroloških postaja Kamenjak i Belgrad. Za svaki od tih kišnih događaja izračunan je volumen bruto oborine (V). Na Slici 6 prikazan je najznačajniji kišni događaj zabilježen na istražnom području Slanog potoka u 2014. godini, kad je zabilježena oborina od 82,4 mm. Volumeni bruto oborine (V) su proračunani iz (1), a rezultati prikazani u Tablici 1.



Slika 6. Hidrogram pale oborine (21.8.2014.) [14]

5.2. Volumen efektivne oborine

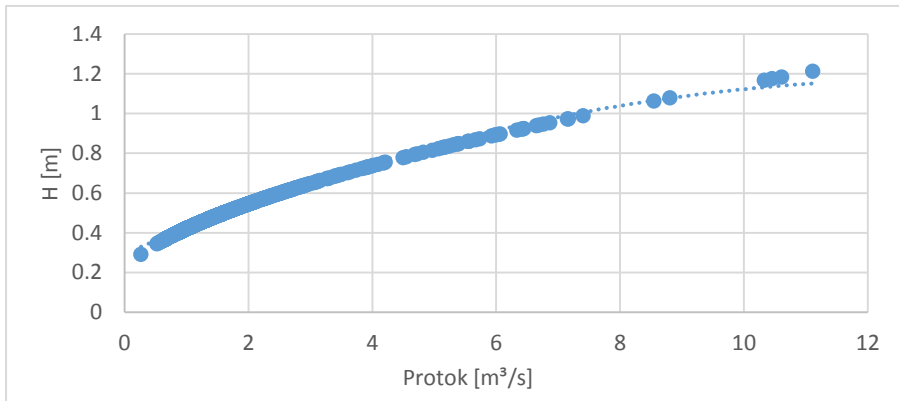
Za izračun volumena efektivne oborine (V_e) koristili su se podaci dobiveni dvominutnim mjerenjem vodostaja tlačnom sondom na pregradi vodotoka Slani potok s pravilnim geometrijskim oblikom. Dimenzije su prikazane na Slici 7 na kojoj je vidljiva kota preljeva, 0,20 metara udaljena od referentne ravnine u kojoj je postavljena tlačna sonda.



Slika 7. Dimenzije preljeva izražene u centimetrima na kojemu su izračunani protoci radi izračunavanja volumena efektivne oborine (V_e)

Kako bi se mogao izračunati volumen efektivne oborine treba najprije definirati pripadajuću protočnu krivulju na mjernom profilu. Protok (Q) izračunan je uz pomoć podataka o preljevnoj razini vode i geometriji preljeva koristeći jednadžbu (2). Srednja duljina preljeva b_{sr} je proračunana iz izraza (4). Kut φ iznosi 43° , a vrijednost n na preljevu je u ovom radu usvojena s 1,06. Na temelju opisanog proračuna je definirana je protočna krivulja i prikazana na Slici 8. Preljevna razina vode je određena u odnosu na referentnu ravninu, a definirano da prelijevanje nastupa za razinu vode višu od 0,20 metara. S obzirom na dubinu kanala, točni protok na preljevu može se definirati do razine vode od

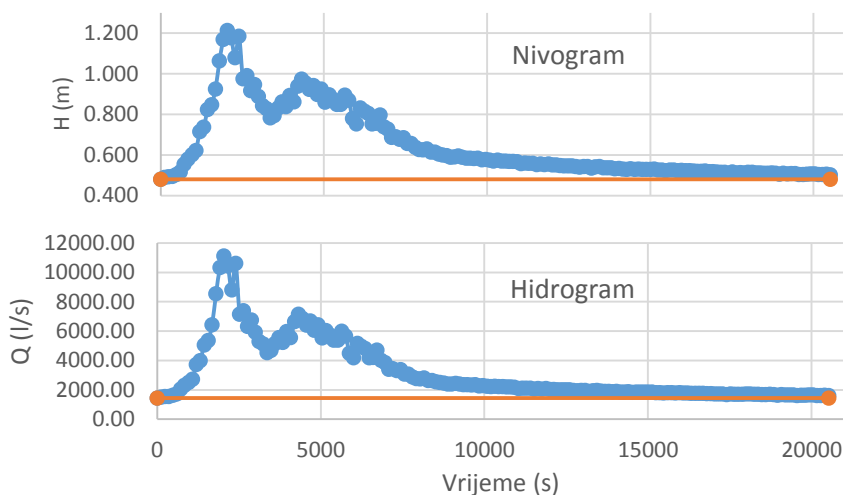
1,0 metar. Kako bi se mogao definirati volumen efektivne oborine (V_e), za preljevne razine vode veće od 1,00 metara je u ovom radu uvedeno pojednostavnjenje. Protoci i preljevne razine vode više od 1,0 metra su proračunani kao i za manje razine, a izlivanje vode iz vodotoka zanemareno. Budući da se izlivanje vode u promatranom razdoblju dogodilo samo u jednom slučaju, smatra se da pojednostavnjenje neće imati značajniji utjecaj na točnost rezultata.



Slika 8. Protočna krivulja vodotoka Slani potok [14]

Iz nivograma dobivenih mjerenjem preljevne razine vode u mjernom profilu s pomoću tlačne sonde su konstruirani hidrogrami vodnih valova koji su nastali kao odziv na deset izabranih kišnih događaja, a na svakom hidrogramu je trebalo odvojiti bazno od izravnog otjecanja. Kako se u ovom slučaju radi o kombiniranoj geološkoj građi sliva, vrlo je zahtjevno točno odvojiti bazno od izravnog otjecanja sa sliva, a u ovoj analizi razgraničenje je određeno pravcem. Na Slici 9 prikazani su nivogram (u odnosu na referentnu ravninu) i hidrogram otjecanja za utjecaj najznačajnijega kišnog događaja u analiziranoj 2014. godini.

Na temelju dobivenog hidrograma za svaki pojedini vodni val te izračunom površine između krivulje hidrograma i pravca koji odvaja bazno od izravnog otjecanja dobiven je volumen efektivne oborine V_e . Površina je izračunana primjenom numeričke integracije. Volumeni efektivne oborine za svaki pojedini kišni događaj su prikazani u Tablici 1.



Slika 9. Nivogram i hidrogram (21.8.2014. 3:30h – 21.8.2014. 13:34h) [14]

5.3. Izračun koeficijenta otjecanja

Nakon što su izračunani volumeni bruto oborina (V) i volumeni efektivne oborine (V_e), iz izraza (4) je proračunan je koeficijent otjecanja (c) za svaki od deset obrađenih kišnih događaja tijekom 2014. godine. Izračunani koeficijenti otjecanja prikazani su u Tablici 1. U nastavku je analiziran i sezonski koeficijent otjecanja te također ukupni koeficijent otjecanja za sve mjerene kišne događaje.

Tablica 1. Koeficijenti otjecanja tijekom 2014. godine na Slanom potoku [14]

Redni broj	Kišni događaj	Količina oborine (mm)	Volumen bruto oborine (m ³)	Volumen neto oborine (m ³)	Koeficijent otjecanja	Godišnje doba	Koeficijent otjecanja
1	09.04.14.	37	90314,34	26498,50	0,29	Projće	c=0,24
2	20.04.14.	6,4	15621,94	2684,45	0,17		
3	28.05.14.	15,2	37102,11	4919,02	0,13		
4	25.06.14.	27,8	67857,80	6075,03	0,09	Ljeto	c=0,13
5	14.08.14.	44,6	108865,39	11955,53	0,11		
6	21.08.14.	82,4	201132,47	35783,08	0,18		
7	01.09.14.	34,8	84944,29	7677,53	0,09		
8	20.09.14.	34,4	83967,92	18762,93	0,22	Jesen	c=0,27
9	22.09.14.	31,4	76645,14	23702,47	0,31		
10	29.11.14.	19,2	46865,82	14326,83	0,31		
Ukupni koeficijent:					c=0,19		

5.4. Diskusija rezultata

Izračunani koeficijenti otjecanja (c) za deset kišnih događaja tijekom proljeća, ljeta i jeseni 2014. godine prikazani su u Tablici 1. Analiza otjecanja sa sliva Slani potok pokazala je da su se najveći koeficijenti otjecanja pojavljivali u rano proljeće i jesen, dok su se u kasno proljeće i u ljetnim mjesecima pojavljivali izrazito niski koeficijenti otjecanja. Najveći su koeficijenti otjecanja zabilježeni 22. rujna i 29. studenog 2014. godine i iznose $c = 0,31$, a najmanji su zabilježeni 25. lipnja i 1. rujna iste godine i iznose $c = 0,09$. Ukupni godišnji koeficijent otjecanja zabilježenih oborina iznosi $c = 0,19$. S obzirom na sezonske koeficijente otjecanja, zabilježene u proljeće ($c = 0,24$) i tijekom jeseni ($c = 0,27$) koji svojim iznosom premašuju ljetni ($c = 0,13$), može se zaključiti da na bilancu vode na području sliva Slani potok najveći utjecaj ima isparavanje, a stanje vlažnosti tla ima manji značaj jer se sliv nalazi na flišnom području, kojega karakterizira nepropusnost. Iako geološke i fizičke osobine sliva Slani potok upućuju na visok koeficijent otjecanja, analiza provedenih mjerenja pokazuje da mu je vrijednost niža od očekivane, što je posljedica isparavanja velikog dijela oborina i transpiracije. Fizičke osobine sliva i kompleksna geološka građa sliva, zajedno s relativno niskim koeficijentima otjecanja su uzroci pojave značajnih vodnih valova, a time i nastanka štetnih pojava, poput bujica, muljnih tokova i debritnih poplava. Ove štetne pojave dovode do stalnog degradiranja površine sliva te pratećih posljedica potencijalno većih razmjera od očekivanih.

6. Zaključak

U ovom je radu izračunana i analizirana promjena koeficijenta otjecanja (c) tijekom godine za značajne oborinske događaje sliva Slanog potoka. Prethodno su analizirani su meteorološki podaci s dvije automatske meteorološke stanice te podaci o razini vode u vodotoku tijekom godine i odabrano deset značajnih kišnih događaja koji su obrađeni u radu. Analiza podataka o vodostajima je potvrdila postojanje tih deset kišnih događaja u obliku stvaranja vodenih valova neposredno nakon početka kišnih događaja.

Analiza prikupljenih mjerenja je za svaki kišni događaj omogućila proračun volumena pale, odnosno bruto oborine (V), kao i volumena otekle, odnosno efektivne oborine (V_e) iz čije se omjera proračunava vrijednost koeficijenta otjecanja (c). S obzirom na međusobne odnose koeficijenata otjecanja u različita godišnja doba, provedene analize su dale očekivane rezultate. Rezultati proračuna ukazuju da se vrijednost koeficijenta otjecanja smanjuje s dolaskom toplijih dana i bujanjem vegetacije te s pojačavanjem isparavanja, a povećavaju u razdobljima hladnijih dana i mirovanja vegetacije. Vrijednosti koeficijenta otjecanja u tijeku godine su između $c = 0,09$ i $c = 0,31$. Najniže

vrijednosti koeficijenata su karakteristične za ljetne mjesece, a najviše su zabilježene u jesen i u rano proljeće.

Vrlo je važno istaknuti da su kontinuirana mjerenja meteoroloških ($\Delta t = 10$ min) i hidroloških parametara ($\Delta t = 2$ min) u malim vremenskim koracima omogućila detaljno analiziranje vodotoka i sliva Slani potok, kao malog sliva. Time je omogućena spoznaja mehanizama procesa o području koje je u velikoj mjeri zahvaćeno štetnim događajima te pronalaženje rješenja za uklanjanje ili barem ublažavanje utjecaja tih događaja na lokalno stanovništvo. Budući da na analiziranom vodotoku nastaju štetne pojave poput bujica, muljnih tokova i debritnih poplava, a karakterizira ga i kratko vrijeme koncentracije, rezultati uobičajenih mjerenja s većim vremenskim koracima ne bi niti mogli biti relevantni rezultate. Zato je vrlo važno nastaviti mjerenja meteoroloških i hidroloških podataka jer omogućavaju da se analiza koeficijenta otjecanja provede na većem i raznovrsnijem nizu podataka.

Iako su vrijednosti koeficijenata otjecanja dobivenih provedenom analizom relativno niske, štetne pojave koje nastaju na slivu Slanog potoka ukazuju na složenost problema. Stoga umanjenu ili sprečavanju štetnih pojava treba pristupiti s velikim oprezom i svakako multidisciplinarno, a za daljnje istraživanje bi bilo poželjno uspostaviti sustav s mjerenjima i vlažnosti tla i isparavanja.

Kontinuirana mjerenja poput ovih na slivu Slanog potoka mogu se primijeniti i na ostale male slivove i vodotoke bujičnog karaktera, što će svakako pridonijeti boljem poznavanju mehanizama otjecanja s malih slivova.

Zahvala. Prikazani rezultati proizašli su iz sljedećih znanstvenih projekata: *Bilateralnoga hrvatsko- japanskoga znanstvenog projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj“ (eng. Risk Identification and Land Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia), trajanje projekta 2009. – 2014.; Sveučilišne potpore za materijalno zahtjevna istraživanja za projekt „Hidrologija vodnih resursa i identifikacija rizika od poplava i blatnih tokova na krškom području“, trajanje projekta: od 2014. do danas, Sveučilište u Rijeci; Projekt „Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci“ (RC.2.2.06-0001,) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH.*

Literatura

- [1] Rubinić, A., Hidrologija sliva Dubračine. Ur. Jelenić, G. *Zbornik radova*, 13, 33-68. Građevinski fakultet u Rijeci. Rijeka, 2010.

- [2] Sušan, I., Razvoj hidrološkog modela otjecanja s malih slivova temeljen na umjetnoj neuronskoj mreži. Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci. Rijeka. Doktorski rad, 2016.
- [3] Ružić, I.; Sušan, I.; Ožanić, N.; Žic, E., Otjecanja sa sliva Slanog potoka i izvora rijeke Dubračine na području Vinodolske doline. Biondić, D.; Holjević, D.; Tropan, Lj. (urednici). Znanstveni skup: Hrvatske vode pred izazovom klimatskih promjena. 226-237. Hrvatske vode. Zagreb. Hrvatska, 2011.
- [4] Benac, Č.; Jurak, V.; Oštrić, M.; Holjević, D.; Petrović, G., Pojava prekomjerne erozije u području Slanog potoka (Vinodolska dolina). Velić, I.; Vlahović, I.; Biondić R. (urednici): Knjiga sažetaka 3. Hrvatski geološki kongres, 173-174. Opatija. Hrvatska, 2005.
- [5] Aljinović, D.; Jurak, V.; Mileusnić, M.; Slovenec, D.; Presečki, F., The origin and composition of flysch deposits as an attribute to the excessive erosion of the Slani Potok valley ("Salty Creek"). *Geologia Croatica*, 63(3), 0-0. Croatia, 2010.
- [6] Sušan, I.; Dragičević, N.; Karleuša, B.; Ožanić, N., Gis based monitoring database for Dubračina river catchment area as a tool for mitigation and prevention of flash flood and erosion. Thirteenth International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. Bratislava. Slovakia, 2013.
- [7] Sušan, I.; Ožanić, N.; Marović, I., Methodology for developing hydrological models based on an artificial neural network to establish an early warning system in small catchments. *Advances in Meteorology*, 2016.
- [8] Žugaj, R., *Hidrologija*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet. Sveučilište u Zagrebu, 2000.
- [9] Merz, R.; Blöschl, G.; Parajka, J., Spatio-temporal variability of event runoff coefficients. *Journal of Hydrology*, 331(3), 591-604., 2006.
- [10] Savenije, H.H., The runoff coefficient as the key to moisture cycling. *Journal of Hydrology*, 176(1-4), 219-225., 1996.
- [11] Norbiato, D.; Borga, M.; Merz, R.; Blöschl, G.; Carton, A., Controls on event runoff coefficients in the eastern Italian Alps. *Journal of Hydrology*. 375(3), 312-325., 2009.
- [12] Wu, J.; Miao, C.; Wang, Y.; Duan, Q.; Zhang, X., Contribution analysis of the long-term changes in seasonal runoff on the Loess Plateau, China, using eight Budyko-based methods. *Journal of Hydrology*, 545, 263-275., 2017.
- [13] Sivapalan, M.; Blöschl, G.; Merz, R.; Gutknecht, D., Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality. *Water Resources Research*, 41 (6), 2005.
- [14] Rosanda, E., Analiza promjene koeficijenta otjecanja u toku godine za sliv Slanog potoka. Građevinski fakultet. Sveučilište u Rijeci. Rijeka. Diplomski rad, 2015.
- [15] Vuković, Ž., *Osnove hidrotehnike*. Prvi dio. Prva knjiga. Akvamarine. Zagreb, 1994.
- [16] Gjurović, M., *Regulacija rijeka*. Tehnička knjiga. Zagreb, 1967.
- [17] Srebrenović, D., *Primijenjena hidrologija*. Tehnička knjiga. Zagreb, 1986.